

物理定数の定数性と宇宙論

電子質量 微細構造定数

瀬戸 治(北大)

With Yo Toda, *Phys. Rev. D* **107**, 083512 (2023)

BBN期の電子質量のズレは意外と許される

With Tomo Takahashi and Yo Toda, *Phys. Rev. D* **108** 023525 (2023)

ヘリウム少なら、 $N_{\text{eff}} < 3$ か $\alpha_{\text{em}} \neq \frac{1}{137}$ か？

§ Introduction

Review articles :

Uzan, Rev. Mod. Phys., **75**, 403, (2003)

Uzan, Living Rev. Relativity, **14**, 2 (2011)

さまざまな物理定数

➤ レベル1

- ✓ 光速
- ✓ プランク定数
- ✓ ボルツマン定数

- 単位に使う
- 物理法則に関わる

➤ レベル2

- ✓ 万有引力定数
- ✓ ゲージ結合定数
- ✓ 湯川結合定数
- ✓ ヒッグス場の期待値
- ✓ 宇宙定数
- ✓ ...

- エネルギー依存 $g(\mu)$
- ディラトン、モジュライ依存
$$M_P^2 = M_*^{2+d} V(t)$$

又ルテスト

➤ 対称性がどこまで正しか

✓ ローレンツ対称性 特殊相対論の破れ 量子重力？

✓ 逆二乗則 ニュートン重力、クーロン電気力

✓ CP対称性 電気双極子能率、...

✓ Noモノポール $SU(3)SU(2)U(1)$ が入る群

➤ 物理定数がどこまで定数か

✓ 各種結合定数 相互作用の強さの時間変化

• (CP以外は)新発見は望み薄だが、物理法則をより確固なものにするという意味では

§ § Variation of constants

[Since Dirac (1938)]

- Gravitational constant
 - large numbers hypothesis [Dirac (1937,1938)]
 - Scalar-tensor theory [Jordan (1937), Brans and Dicke (1961)]
 - $G\hbar \propto 1/t$ [Chodos and Detweiler (1980)] in Kaluza-Klein theories [Kaluza (1921), Klein (1926)]
 - Radar-echo time delay [Shapiro et al (1971), ...]
 - Lunar Laser Ranging experiment [Williams et al (1976),...]
 - MESSENGER mission $\dot{G}/G < 4 \times 10^{-14} / \text{yr}$ [Genova et al (2018)]

§ § Variation of constants

- Variation of the fine structure constant

- QSO [Savedoff (1956), ..., Webb et al (1999), ...]
- 隕石の放射年代測定 [Wilkinson (1958), Dyson (1974), ...]
- Atomic clock [Turneaure and Stein (1974), ...]
- Oklo natural reactor [Shlyakhter (1976), ..., Fujii et al (2002)]

$$-0.24 < \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \times 10^7 < 0.11 \text{ [Gould et al (2006)]}$$



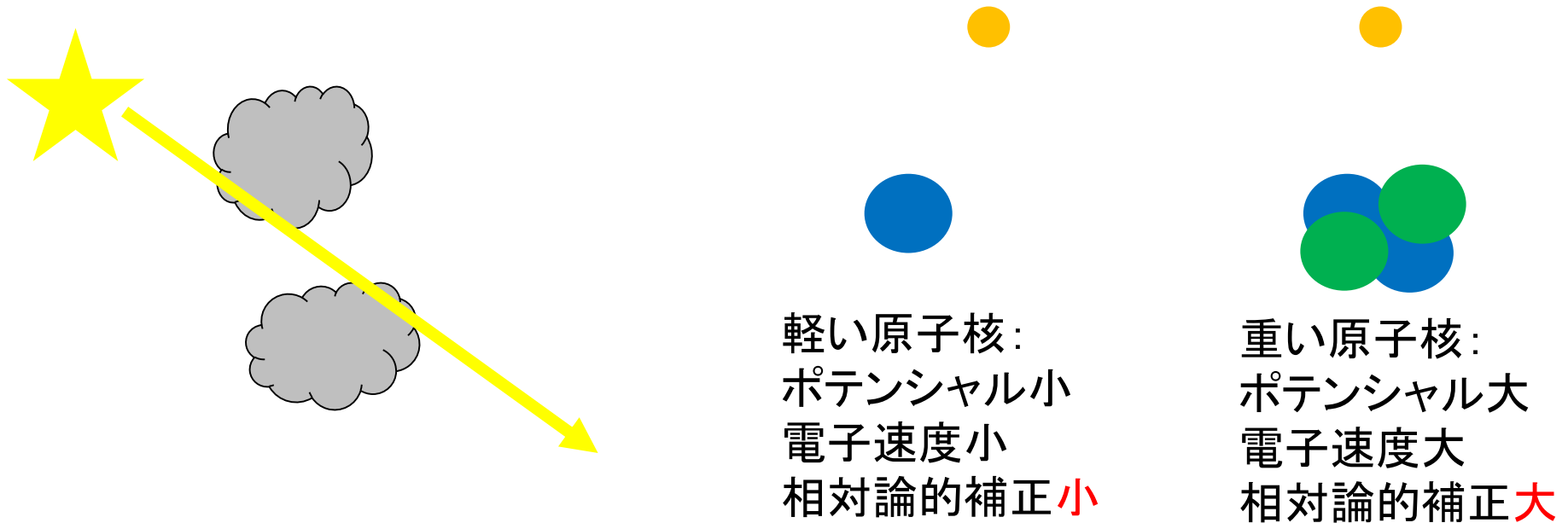
credit: US DOE

- Variation of electron mass

- QSO [Cowie and Songaila (1995)]
- Scalar field model [Barrow and Magueijo (2005)]

§ § $\Delta\alpha \neq 0$ の“発見” [Webb et al (1999)]

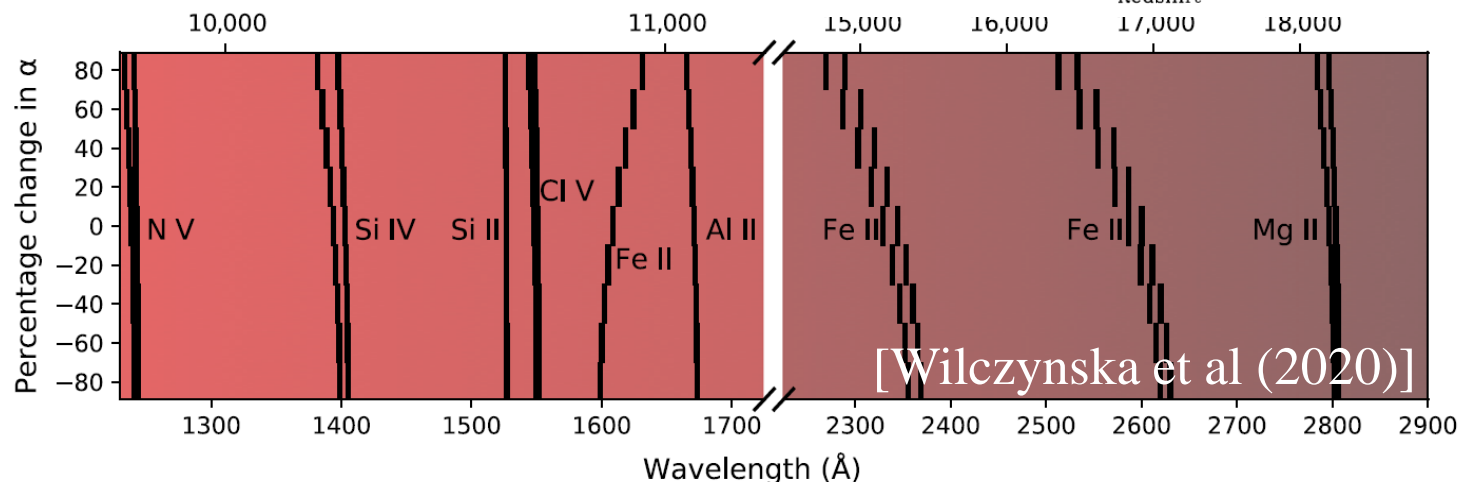
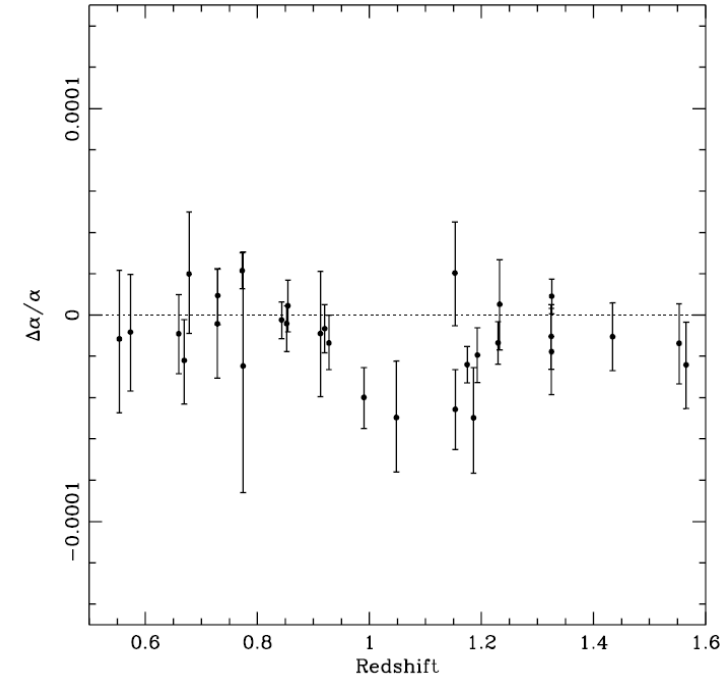
- QSO の様々な吸収線を測定



- $\Delta\alpha$ に対する応答
 - 基底状態の方が影響を受けやすい
 - 波長の変化の多寡(と向きも)は、元素、イオンにより異なる。識別しやすい!

§ § $\Delta\alpha \neq 0$ の“発見” [Webb et al (1999)]

- QSO の様々な吸収線を測定
- $\Delta\alpha$ に対する応答
 - 基底状態の方が影響を受けやすい
 - 波長の変化の多寡(と向きも)は、元素、イオンにより異なる。
識別しやすい!



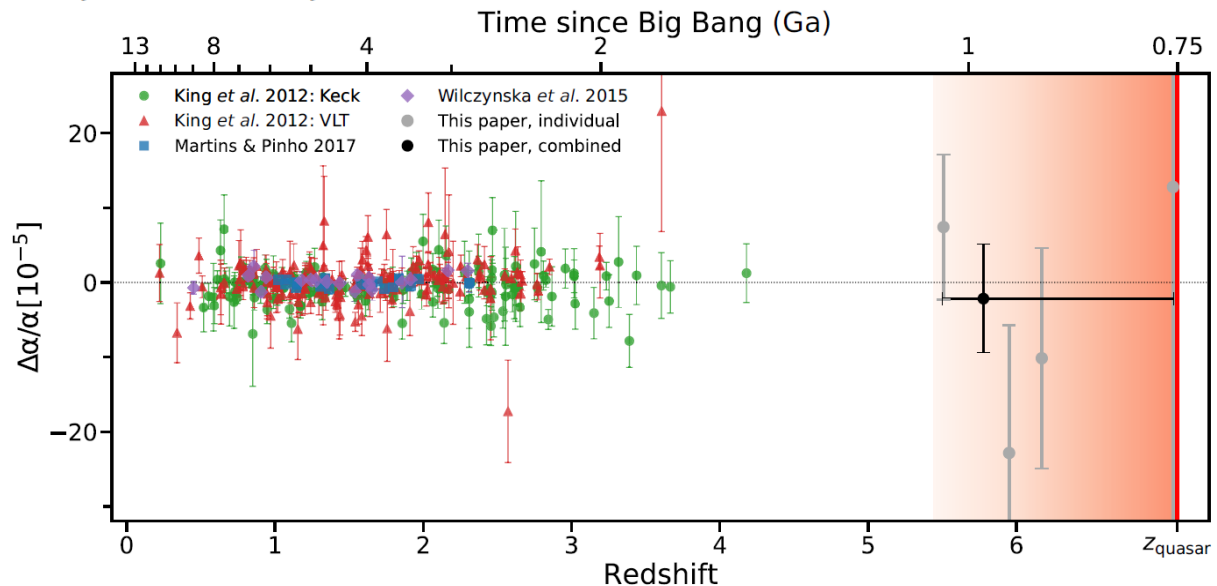
§ § $\Delta\alpha \neq 0$ の“発見”のその後

- **ゼロコンシステント** [Wilczynska et al (2020)]
 - **ただし、空間依存性の兆候あり**

Four direct measurements of the fine-structure constant 13 billion years ago

Michael R. Wilczynska¹, John K. Webb^{1*}, Matthew Bainbridge², John D. Barrow³, Sarah E. I. Bosman⁴, Robert F. Carswell⁵, Mariusz P. Dąbrowski⁶, Vincent Dumont⁷, Cl Ana Catarina Leite^{8,9,10}, Katarzyna Leszczyńska⁶, Jochen Liske¹¹, Konrad Marosek¹², Carlos J. A. P. Martins^{8,9}, D

Observations of the redshift ; constant, α , over the redshift 0.8 billion years old. These are a near-IR spectrograph. A new graph on the Very Large Teles mean electromagnetic force $\alpha_0)/\alpha_0 = (-2.18 \pm 7.27) \times 10^{-5}$, data, we find a spatial variatic



§ § Atomic clock

- Atomic transitions
- e.g., hydrogen
 - $\nu \propto R_\infty$ (Gross)
 - $\nu \propto R_\infty \alpha_{\text{em}}^2$ (fine)
 - $\nu \propto R_\infty \alpha_{\text{em}}^2 g_p \frac{m_e}{m_p}$ (hyper-fine)
- Various atoms: H, Rb, Cs, Hg, ..., with nuclei's gyromagnetic factor and relativistic corrections

$$\frac{d}{dt} \ln \left(\frac{\nu_{\text{Al}}}{\nu_{\text{Hg}}} \right) = (-5.3 \pm 7.9) \times 10^{-17} / \text{yr} \quad [\text{Rosenband et al (2008)}]$$

$$\frac{\nu_{\text{Al}}}{\nu_{\text{Hg}}} \propto \alpha_{\text{em}}^{-3.208}$$

$$\frac{d}{dt} \ln(\alpha_{\text{em}}) = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} / \text{yr}$$

§ § Okloの制限 [Shlyakhter (1976)]

- $^{149}_{62}\text{Sm}$ が極端に少ない
- 炉として反応してた頃に熱中性子の吸収

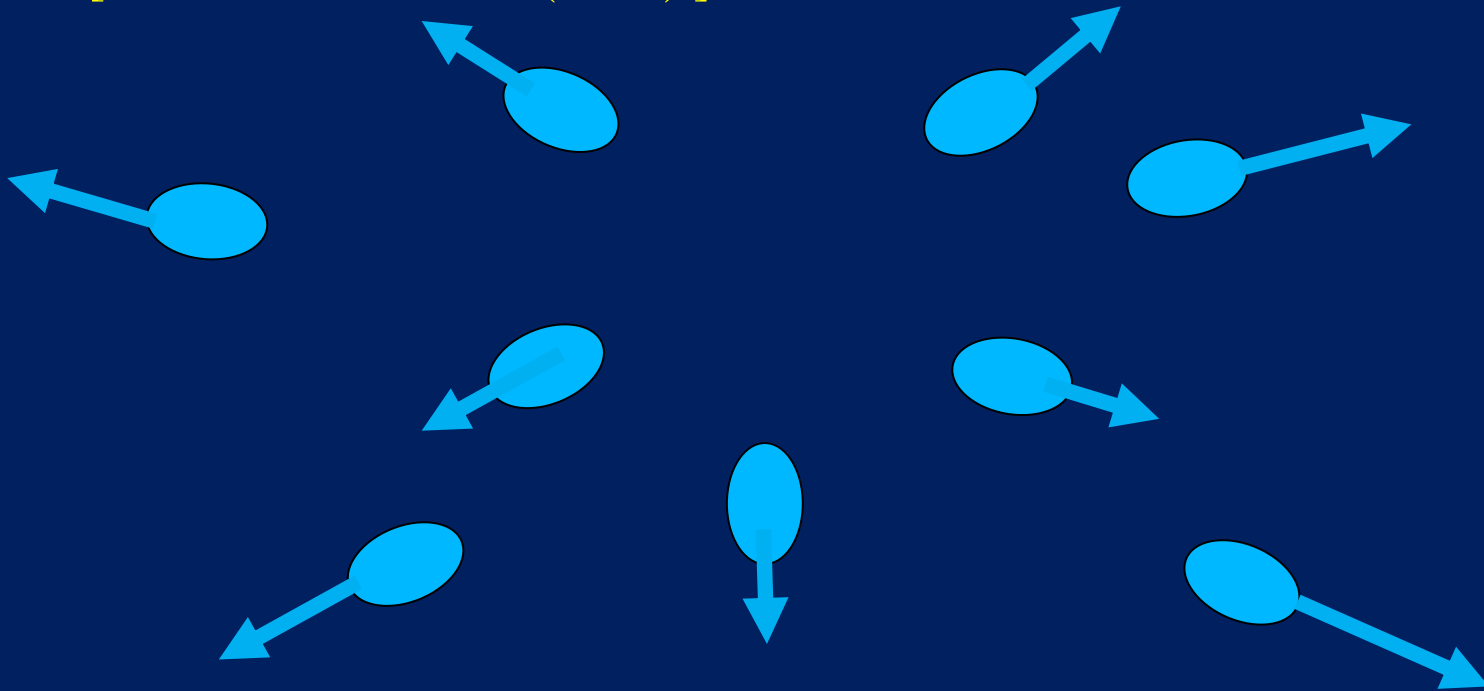


- この resonance は、strong int. とクーロン斥力のキャンセルで生じる
- Isotope abundance を核反応連立方程式の解と測定値とを比較して cross section を見積もり
 - 依存性 $\frac{\Delta\alpha_s}{\alpha_s} \sim \frac{\Delta E_r}{V_0}$, the potential depth V_0 より $\frac{\Delta\alpha_s}{\alpha_s}$ 制限
 - strong int. とクーロン斥力のキャンセルより $\frac{\Delta\alpha_{\text{em}}}{\alpha_{\text{em}}}$ 制限に翻訳

§ Big Bang Cosmology

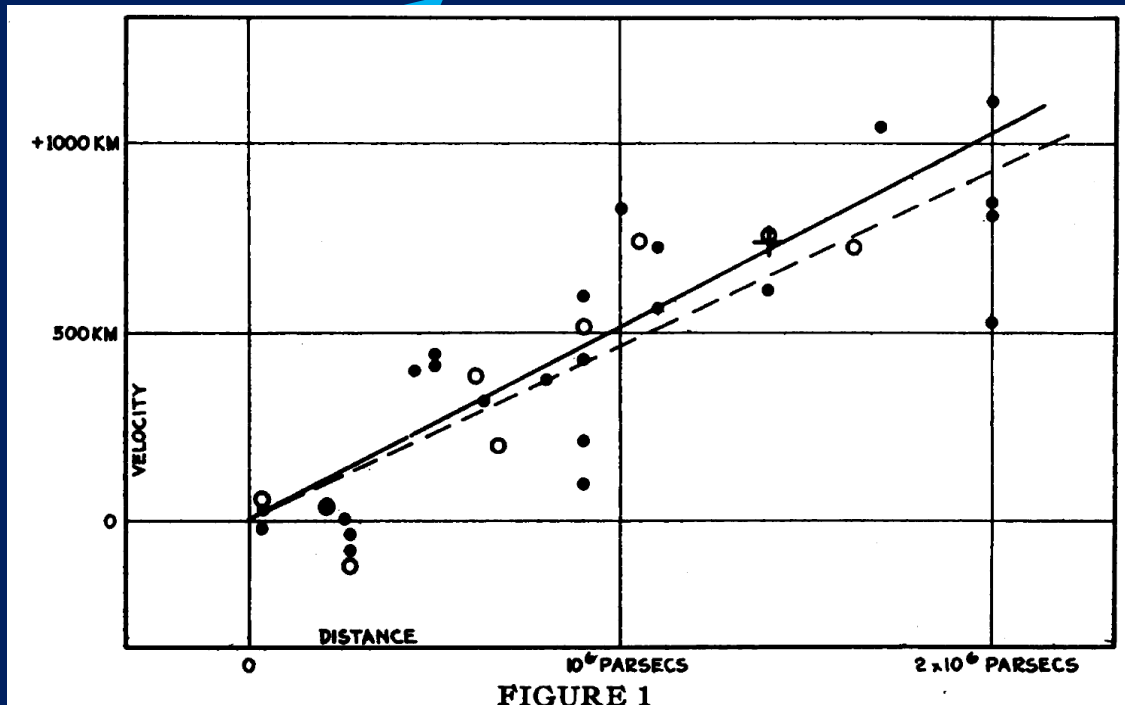
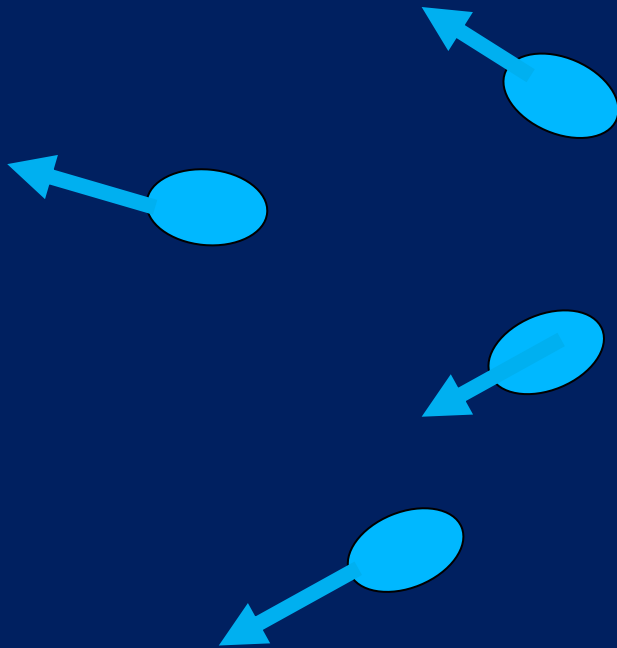
Success of Big Bang Cosmology

1. Cosmic Expansion [Hubble (1929)]
2. Big Bang Nucleosynthesis [Gamow (1946), Alpha et al (1948)]
3. Cosmic Microwave Background Radiation
[Penzias and Wilson (1965)]



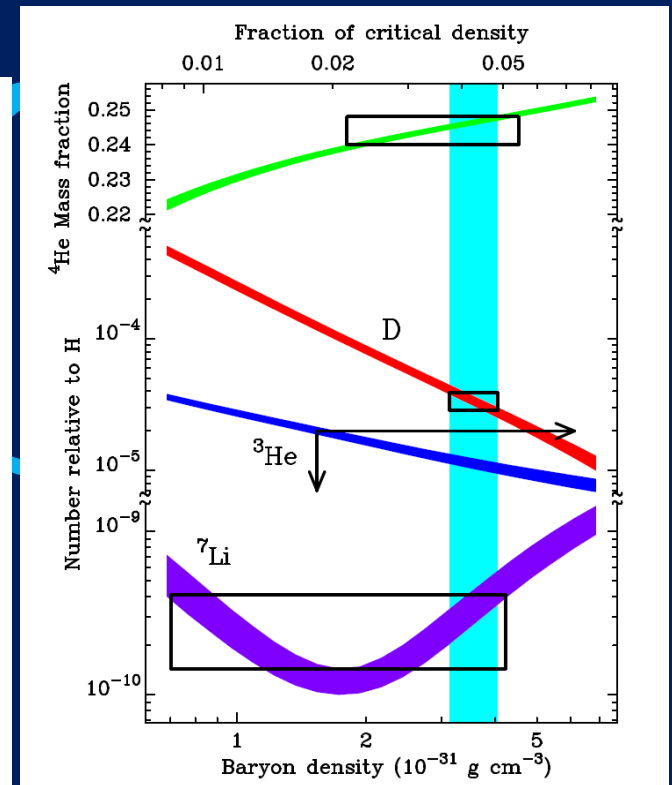
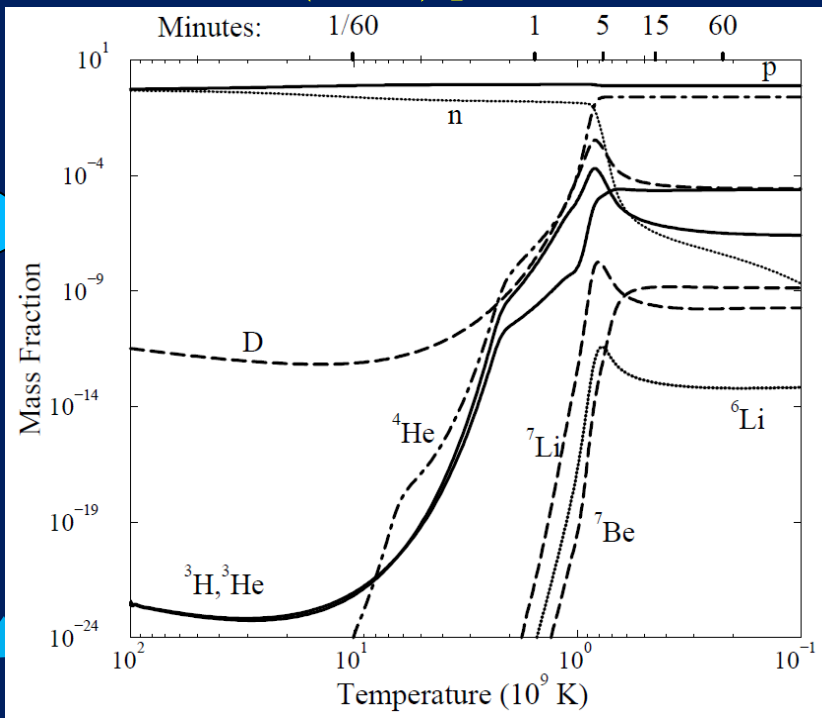
Success of Big Bang Cosmology

1. Cosmic Expansion [Hubble (1929)]
2. Big Bang Nucleosynthesis [Gamow (1946), Alpha et al (1948)]
3. Cosmic Microwave Background Radiation
[Penzias and Wilson (1965)]



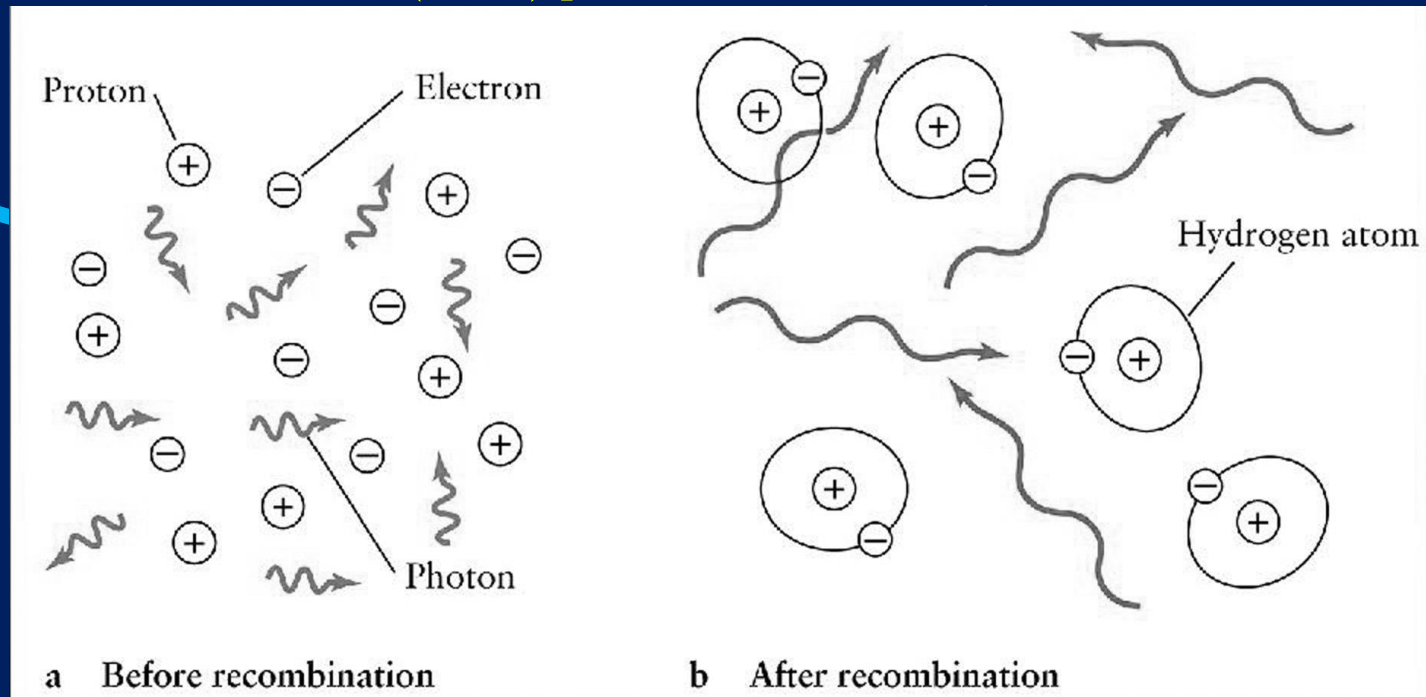
Success of Big Bang Cosmology

1. Cosmic Expansion [Hubble (1929)]
2. Big Bang Nucleosynthesis [Gamow (1946), Alpha et al (1948)]
3. Cosmic Microwave Background Radiation [Penzias and Wilson (1965)]



Success of Big Bang Cosmology

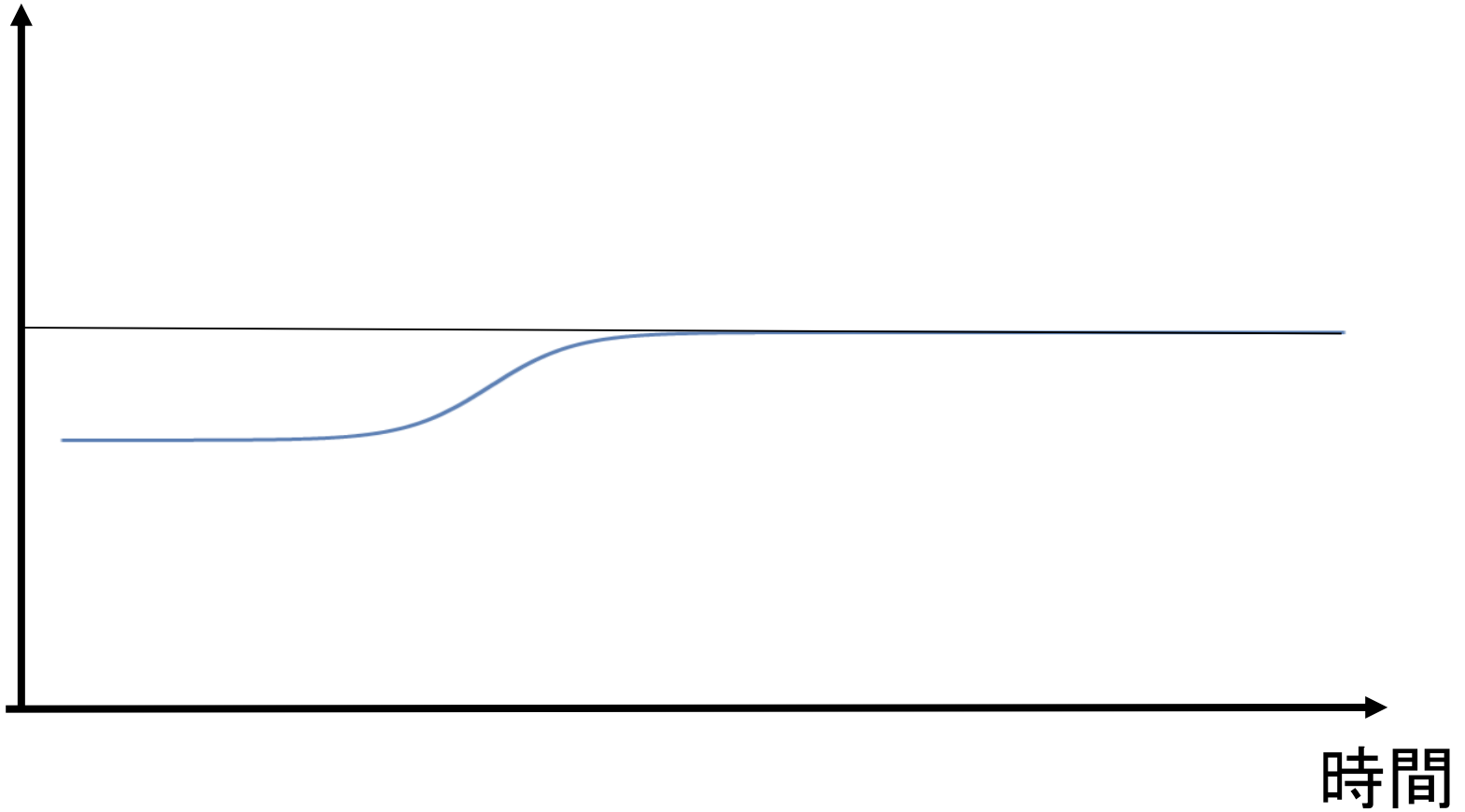
1. Cosmic Expansion [Hubble (1929)]
2. Big Bang Nucleosynthesis [Gamow (1946), Alpha et al (1948)]
3. Cosmic Microwave Background Radiation [Penzias and Wilson (1965)]



“定数”の時間変化

物理量

現在値



§ § 宇宙論的制限

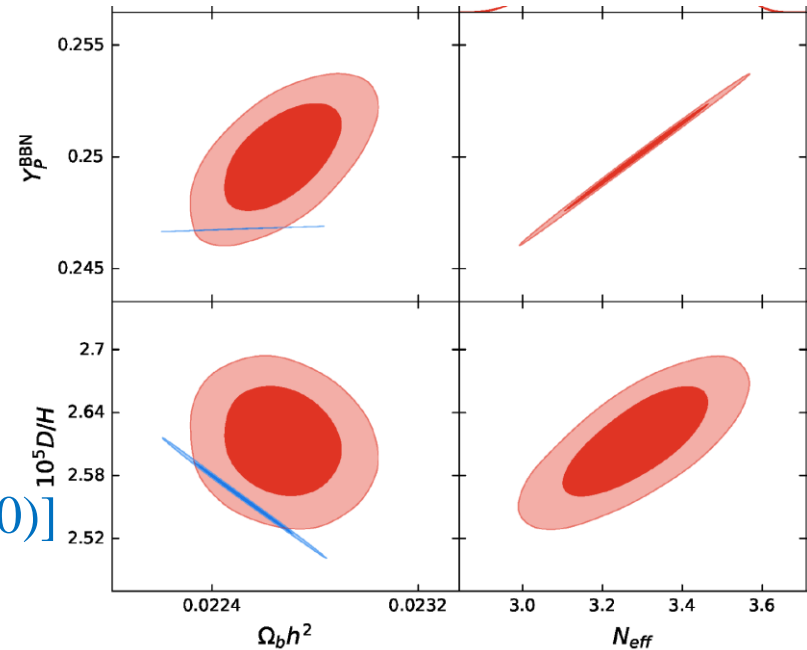
- BBN constrains constants and new physics

➤ $G_N \uparrow$ or $N_{\text{eff}} \uparrow \rightarrow H \uparrow n/p \uparrow Y_P \uparrow$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \frac{\pi^2}{30} g_* T^4$$

$$g_* = g_*^{\text{SM}} + \frac{7}{8} \sum_{\text{new}} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4$$

$$N_{\text{eff}} = 2.86 \pm 0.15 \text{ [Field et al (2020)]}$$



[Seto and Toda (2021)]

➤ Long-lived heavy particle

- Gravitinos [Khlopov and Linde (1984), Ellis et al (1984),...]
- ...

§ § 宇宙論的制限

- CMB constrains constants and new physics

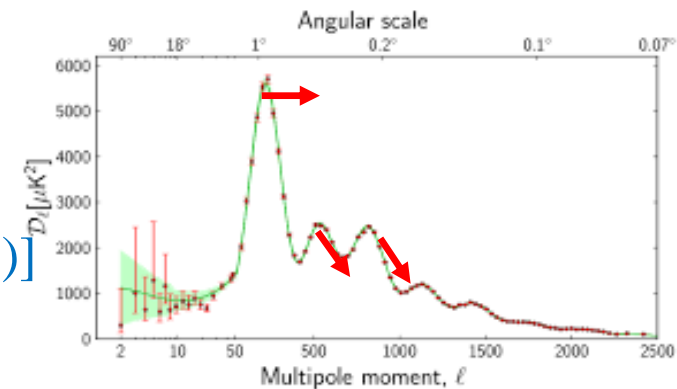
- $G_N \uparrow \rightarrow$ the Hubble horizon $H^{-1} \downarrow$
 - Acoustic peaks **to high ℓ** ; the sound horizon $c_s H^{-1}$
 - **More** diffusion (Silk) dumping at j-th peak: $\lambda \propto j H^{-1}$

$$\lambda_D = \left(H^{-1} \frac{1}{n\sigma_T} \right)^{1/2} \downarrow \quad \text{then dumping factor } e^{-\left(\frac{\lambda_D}{\lambda}\right)^2} \downarrow$$

- $\Delta G / G < 1.9 \times 10^{-3}$ [Obata et al (2017)]

- Cosmological constant

$$w_0 = -1.028 \pm 0.031 \quad [\text{Planck (2018)}]$$



Standard cosmological model で よくあっているので

- 制限のみ得られる
- ヌル&CONSISTENT = ヌルCONSISTENT

Standard cosmological model でよく合わないことがあるなら

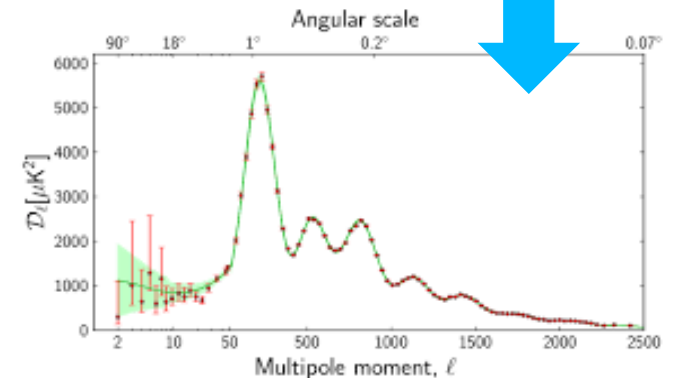
、、、

§ Hubble (H_0) Tension

§ § Estimation of Hubble parameter

1. Hubble law (low z)

- SN + Cepheid : SH0ES 73.04 ± 1.04 km/s/Mpc [Riess et al (2021)]
- SN + TRGB : 69.8 km/s/Mpc [Freedman et al (2019)]
- ...



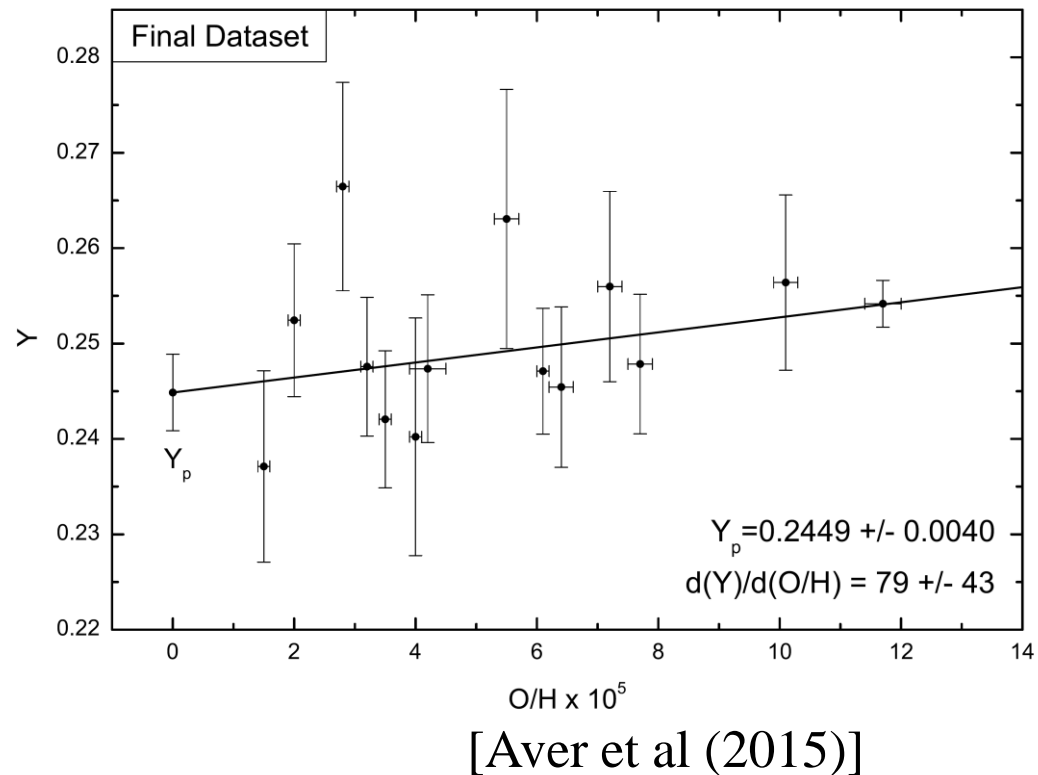
2. Cosmology (high z)

- CMB 67.4 ± 0.4 km/s/Mpc [Planck (2018)]
- BAO+BBN $68.3^{+1.1}_{-1.2}$ km/s/Mpc [Schoneberg et al (2019)]

§ EMPRESS anomaly on helium
abundance

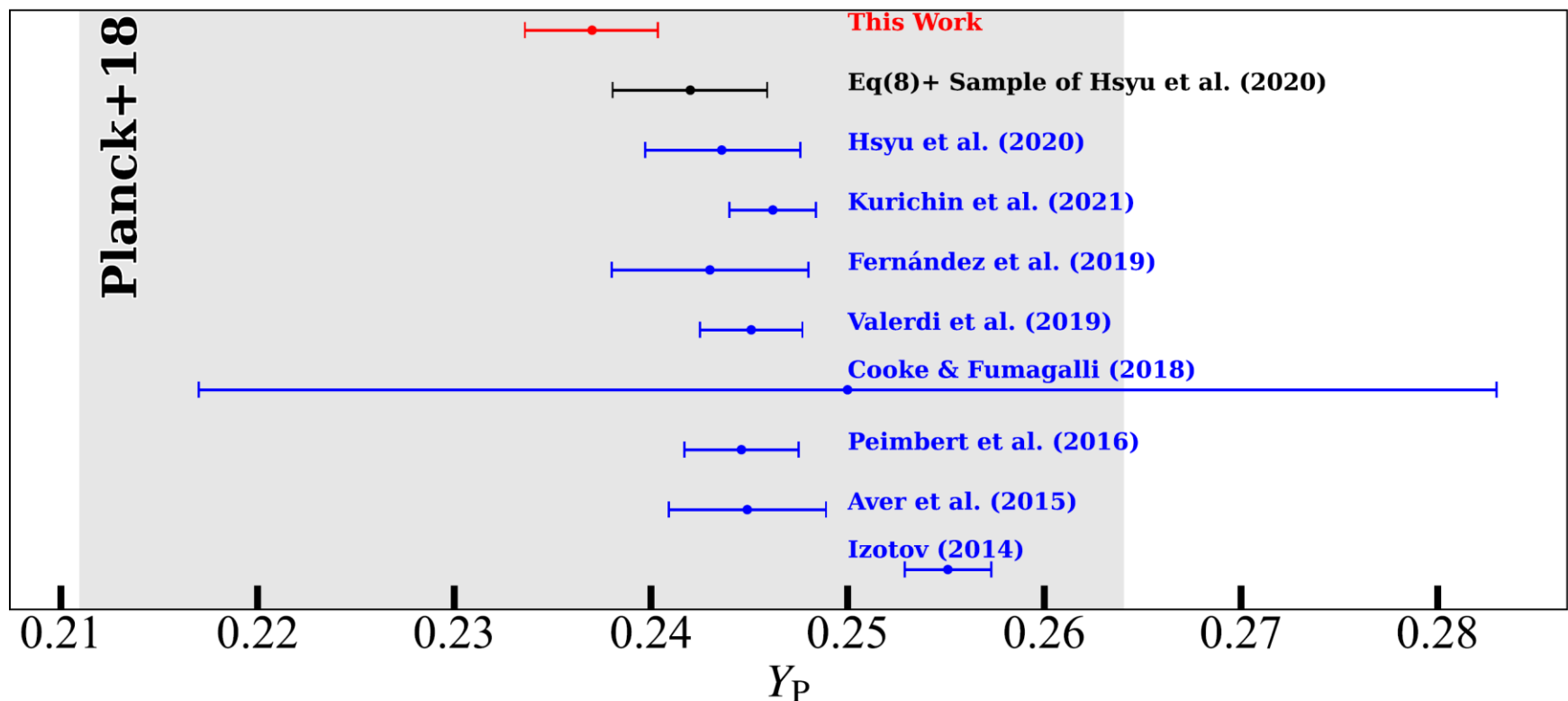
BBNへリウム生成量の推定

- He は他の重元素と共に星の中でも作られる。
- 金属の少ない所は、星起源の He も少ない。
- 金属の少ないところの He を測定し、金属量 0 極限に外挿



EMPRESS の結果 [Matsumoto et al (2022)]

- Subaru で新たに発見された極低金属銀河をサンプルに
- 他の観測との比較



EMPRESS の解釈 [Matsumoto et al (2022)]

- バリオン数はPlanckと整合的

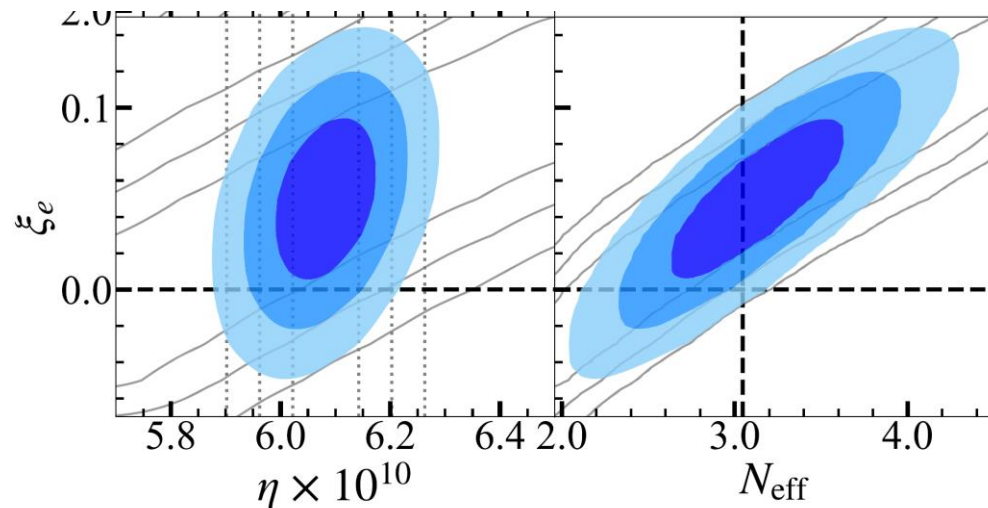
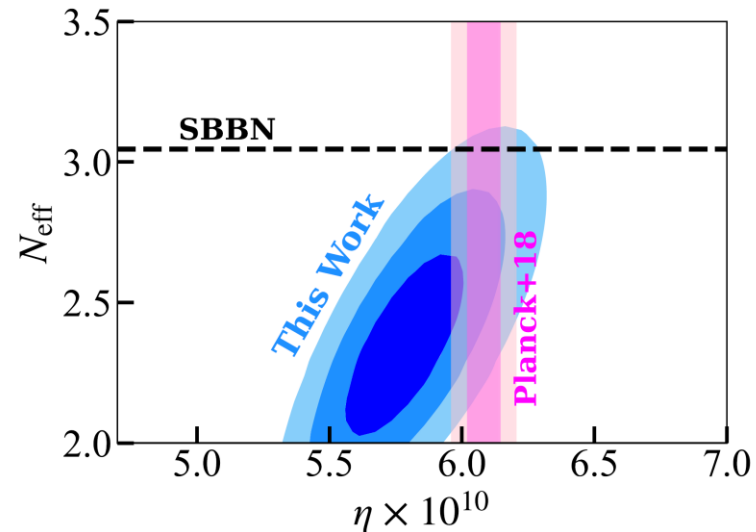
- $N_{\text{eff}} \cong 2.37$

または

- $N_{\text{eff}} \cong 3 + \text{レプトン非対称}$

$$\xi_e \cong 0.05$$

$\bar{\nu}p^+ \rightarrow ne^+$ 抑制



Standard cosmological model で 良さそうだが、

- ハッブル定数の不一致
- Standard BBN の予言と EMPRESS 結果の
不一致

を気にするなら

- ~~制限のみ得られる~~ → ずれを示唆？
- ~~ヌルコンシストント~~

§ Hubble tension や EMPRESS
results は物理定数の時間変化を示
唆するか？

Hubble tension の場合

- 重力定数

- スカラーテンソル理論 [Ballesteros et al (2020)]

- $(M_P^2 + \beta\phi^2)R$ model confronts PN constraints

- 修正重力の現象論モデル [Lin, Raveri and Hu (2019)]

- ゆらぎの式の中のパラメーター

$$k^2\Psi = -4\pi\mu G a^2 (\Delta\rho + 3(\rho + p)\sigma)$$

が都合よく変化する仮定

- 宇宙定数

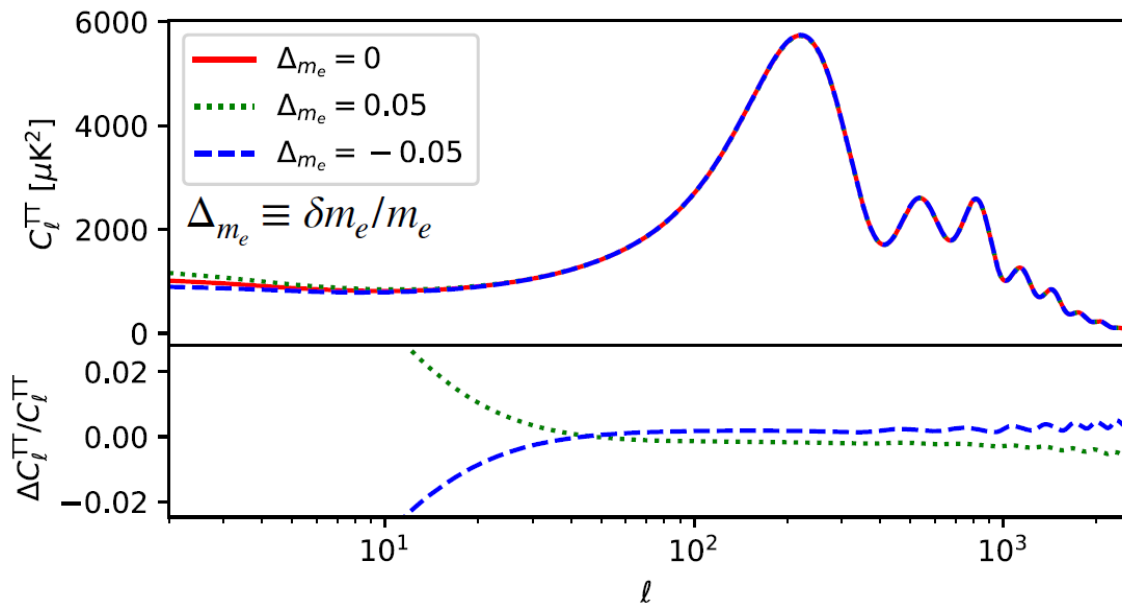
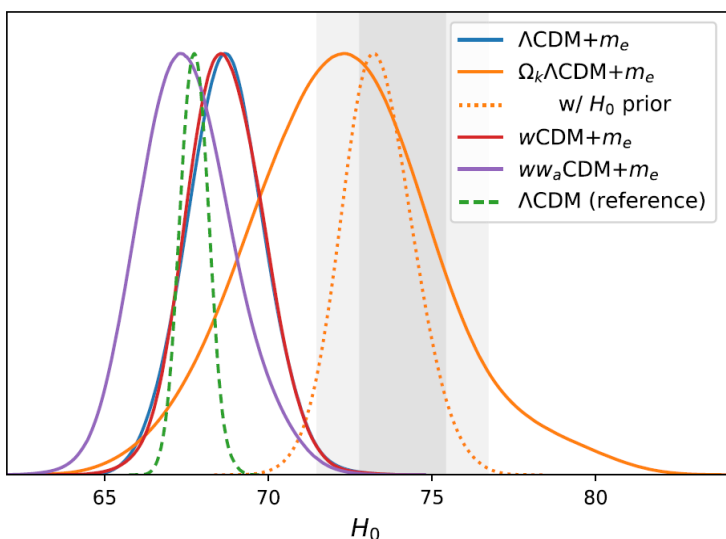
- 早期ダークエネルギー [Poulin, Smith, Karwal and Kamionkowski (2019)]

- Phantom dark energy ($w < -1$) [Keely, Joudaki, Kaplinghat and Kirkby (2019)]

Hubble tension の場合

- **電子質量** [Hart and Chluba (2020), Sekiguchi and Takahashi (2020)]

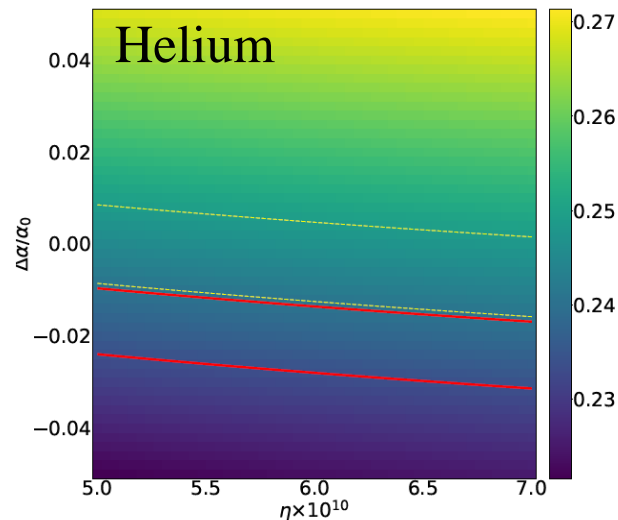
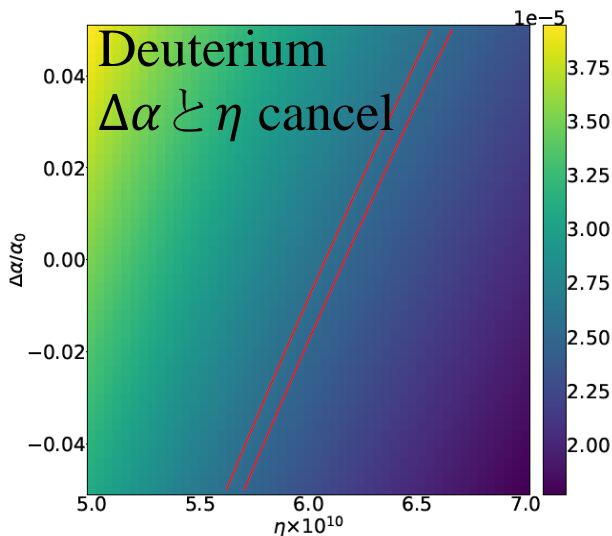
- バリオン、CDM、電子質量の同時変化に関するパラメータ縮退



- Hubble tension を完全に解くには正曲率が必要 [Sekiguchi and Takahashi (2020)]
- BBNに対する影響小 [Seto and Toda (2022)]

EMPRESS の場合

- 重力定数 [Kohri and Maeda (2022)]
 - $G_N \uparrow$ or $N_{\text{eff}} \uparrow \rightarrow H \uparrow$ $n/p \uparrow$ $Y_p \uparrow$
- 早期ダークエネルギー [Takahashi and Yamashita (2023)]
- 微細構造定数 [Seto, Takahashi and Toda (2023)]
 - $\alpha_{\text{em}} \downarrow \rightarrow Q := m_n - m_p \uparrow$
 - \rightarrow suppress $p \rightarrow n$ conversion rate
 - \rightarrow nuclear reaction cross section \uparrow
for less Coulomb repulsive



§ Summary

- 物理定数は、言葉の定義によれば定数だが、、
たまには確認

Q. Hubble tension や EMPRESS results は物理定数の時間変化を示唆するか？

A. そういう“解釈”は可能